

**ZESZYTY NAUKOWE NR 3(75)
AKADEMI MORSKIEJ
SZCZECIN 2004**

PRACE WYDZIAŁU NAWIGACYJNEGO

Jakub Montewka

**Analiza błędów metody rzeczywistej
wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statków**

Słowa kluczowe: bezpieczny obszar manewrowy, błędy metod kształtowania dróg wodnych, pomiary laserowe, inżynieria ruchu morskiego.

W referacie przedstawiono szczegółową analizę błędów metody rzeczywistej wyznaczania bezpiecznego akwenu manewrowego statku w płaszczyźnie poziomej opartej na pomiarach wykonanych dalmierzami laserowymi oraz propozycje pewnych rozwiązań mające na celu zwiększenie ich dokładności.

**Error Analysis of the Method
of Determining the Safe Manoeuvring Area for Vessels**

Keywords: safety maneuvering area, errors of methods of determining waterways parameters, laser rangefinder measurement, marine traffic engineering.

The article presents the error analysis of the method of determination the horizontal dimensions of safety maneuvering area for vessels, based on laser measurements. Some solutions of reducing these errors have been suggested as well.

Wstęp

Metoda rzeczywista wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statku jest metodą eksperymentalną, bazującą na pomiarach wykonanych przy zastosowaniu dalmierzy laserowych oraz kompasów elektronicznych. Urządzenia te, oparte na nowoczesnych technologiach, znane są w geodezji lądowej oraz wodnej jako urządzenia bardzo precyzyjne. Wykorzystywanie tachimetrów elektronicznych wyposażonych w dalmierz impulsowy z celownikiem laserowym otwiera nowe możliwości w zakresie pomiarów inżynierskich. Dzięki tego typu dalmierzom można wykonywać pomiar odległości bez konieczności stosowania reflektorów (czy folii odbłaskowych), co umożliwia określenie współrzędnych punktów reprezentujących widoczną, lecz nie dostępną powierzchnię obiektów jak np. przepływający kanałem statek [4].

Ze względu na precyzję wykonywanych pomiarów oraz stosunkowo niskie nakłady finansowe związane z zakupem oraz eksploatacją sprzętu, postanowiono wykorzystać wspomniane urządzenia do potrzeb inżynierii ruchu morskiego. W omawianej metodzie wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statku, układ pomiarowy pozwalający określić wielkość pasa ruchu statku, składa się z:

- dalmierza laserowego
- kompasu elektronicznego.

W artykule poruszony zostanie problem dokładności pomiaru wykonanego przy użyciu przedstawionego przyrządu. Dokładność pomiaru odległości w przypadku dalmierza oraz pomiaru kąta w przypadku kompasu to dwa podstawowe czynniki decydujące o wielkości błędu, jakim obarczona jest metoda rzeczywista wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego. Błąd ten przyjmuje wartości zmienne, zależnie od położenia obserwowanego statku w stosunku do stanowiska pomiarowego.

Aby wyznaczyć elementy składowe błędu metody przeprowadzono eksperyment terenowy oraz dokonano analizy statystycznej wyników pomiarów. Rezultaty eksperymentu oraz propozycje kompensacji oszacowanych błędów zamieszczono w kolejnych częściach artykułu.

1. Źródła błędów metody

Eksperymentalna metoda wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego, oparta na pomiarach wykonanych dalmierzem laserowym z dołączonym kompasem elektronicznym, charakteryzuje się zmienną wartością błędu. Niepewności pomiarowe metody powstają w wyniku kumulacji błędów instrumentalnych urządzeń pomiarowych oraz wskutek zastosowanej techniki wykonywania pomiarów.

Błąd metody rzeczywistej wymiarowania obszaru manewrowego statku można podzielić na następujące błędy składowe:

- błędy instrumentalne,
- błędy wygenerowane na etapie obróbki danych oraz błędy związane z transformacją wyników do wybranego układu odniesienia,
- błędy wynikające z przyjętej metody wykonywania pomiarów,

W artykule dokonana zostanie analiza wpływu poszczególnych błędów na dokładność ostateczną metody oraz przedstawione zostaną propozycje rozwiązań mających na celu zmniejszenie wartości błędów.

1.1. Wpływ błędów instrumentalnych na dokładność pomiaru

Na podstawie testów terenowych dalmierzy laserowych oraz stosując analizę statystyczną można określić rzeczywistą wielkość błędów, jakimi obciążone są wykonywane pomiary. Wartość błędu, jakim obciążony jest pomiar bezpośredni charakteryzowana jest przez elipsę błędu, która opisywana jest przez trzy parametry:

1. *Mała półoś elipsy* – b , jest to prosta leżąca na linii mierzonego kierunku do charakterystycznego punktu kadłuba statku. Wielkość parametru b wynika z dokładności pomiaru odległości przez rozpatrywane urządzenia. Wartość tej niepewności pomiarowej dla opisywanego przypadku jest stała i wynosi 0,05m.
2. *Duża półoś elipsy* – a , jest to styczna do linii pozycyjnej z odległości do mierzonego charakterystycznego punktu kadłuba statku w tym punkcie. Wielkość parametru a wynika z dokładności pomiaru kąta przez urządzenie.

Rozpatrując wymiar liniowy tego parametru, jest on wielkością zmienną, zależną od odległości (d), pomiędzy dalmierzem a obserwowanym punktem:

$$a = f(\delta_\alpha; d) \quad (1)$$

$$a = d \cdot \operatorname{tg} \delta_\alpha \quad [\text{m}] \quad (2)$$

gdzie:

- d – odległość obiektu od stanowiska pomiarowego [m],
- δ_α – niepewność pomiaru kąta

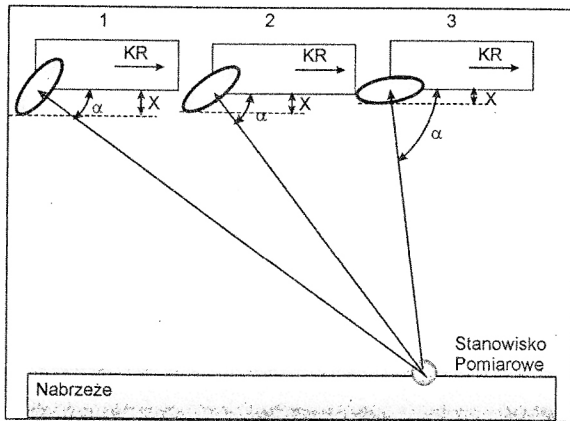
3. *Kąt nachylenia elipsy* – χ – jest to kąt zawarty pomiędzy dużą półosią „ a ” a linią pomiarową biegnącą wzdłuż burty jednostki. Kąt ten charak-

teryzuje się zmiennymi wartościami, w zależności od kąta α , czyli kąta padania wiązki lasera na kadłub poruszającego się statku.

$$\chi = 90^\circ - \alpha; \quad \text{dla } \alpha < 90^\circ, \quad (3)$$

$$\chi = \alpha - 90^\circ; \quad \text{dla } \alpha > 90^\circ \quad (4)$$

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie wpływ ustawienia elipsy błędów na wielkość błędu (X) określenia szerokości pasa ruchu statku podczas pojedynczego przejścia torem wodnym. Na ułożenie elipsy błędów w stosunku do kadłuba statku wpływa kąt widzenia jednostki (α), czyli kąt pod jakim na burtę jednostki w punkcie charakterystycznym pada wiązka lasera.



Rys. 1. Wpływ wartości kąta widzenia kadłuba statku (α) na ułożenie elipsy błędów oraz na wielkość błędu wyznaczenia szerokości pasa ruchu jednostki (X)

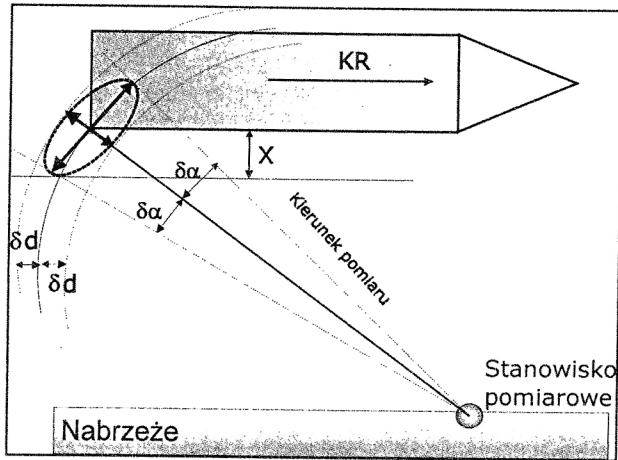
Fig. 1 The influence of the angle of sight (α) on the layout of the ellipse of errors and the overall error of the ship's width path (X) determination

Na rysunku 2 przedstawiono graficzną interpretację elipsy błędów z zaznaczonymi niepewnościami pomiaru kierunku i odległości. Wyszczególniono również parametr X dla danego kąta nachylenia elipsy χ . Wartość tego parametru wyliczana jest z następującej zależności:

$$X = a \cdot \cos(\chi) \text{ [m]} \quad (5)$$

gdzie:

- X – błąd wyznaczenia szerokości pasa ruchu statku w pojedynczym przejeździe wynikające z ułożenia elipsy błędów [m],
- a – duża półoś elipsy [m].



Rys. 2. Parametry elipsy błędów przy z zaznaczonymi błędami pomiarowymi: kąta (δ_α), oraz odległości (δ_d)

Fig. 2. The parameters of the ellipse of errors, where δ_α is the accuracy of the angle measurement and δ_d is the distance measurement accuracy

1.2. Błędy wygenerowane na etapie obróbki danych oraz błędy związane z transformacją wyników do wybranego układu odniesienia

Dane pochodzące bezpośrednio z pomiaru, jakimi dysponuje obserwator, obciążone błędami, które zostały scharakteryzowane w poprzednim podpunkcie to:

- zredukowana odległość,
- kąt (niar rzeczywisty) do obserwowanego punktu.

Transformacja współrzędnych do układu kartezjańskiego polega na zamianie wyznaczonych w eksperymencie współrzędnych biegunowych (d , α) na współrzędne prostokątne (X , Y). Współrzędne biegunowe transformuje się do układu kartezjańskiego wykonując następujące przeliczenie:

$$x = d \cdot \cos(\alpha) \text{ [m]} \quad (6)$$

$$y = d \cdot \sin(\alpha) \text{ [m]} \quad (7)$$

gdzie:

- d – zmierzona odległość zredukowana od stanowiska do obserwowanego punktu charakterystycznego [m],
- α – zmierzony niar rzeczywisty na obserwowany punkt charakterystyczny [°].

Z transformacją współrzędnych związany jest problem propagacji niepewności parametrów wejściowych na wartości parametrów wyjściowych. Niepewność związana z wyznaczaniem współrzędnych kartezjańskich (X,Y) można oszacować stosując przekształcenia z zakresu teorii przenoszenia błędów. Dla powyższego przypadku niepewności X oraz Y będą wynosiły odpowiednio [5]:

$$\frac{\delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\cos \alpha)}{\cos \alpha}\right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\sin \alpha)}{\sin \alpha}\right)^2} \quad (9)$$

$$\delta \cos(\alpha) = \left| \frac{\delta \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)} \right| \cdot \cos(\alpha) = |\sin \alpha| \cdot \delta(\alpha) \quad (10)$$

$$\delta \sin(\alpha) = \left| \frac{\delta \sin(\alpha)}{\sin(\alpha)} \right| \cdot \sin(\alpha) = |\cos \alpha| \cdot \delta(\alpha) \quad (11)$$

Wyznaczone w ten sposób niepewności pozwalają na wyznaczenie elipsy błędu w nowym układzie odniesienia. Ponieważ funkcja opisująca propagację błędu jest funkcją dwóch zmiennych: kąta oraz odległości, wyliczone niepewności są wartościami zmieniającymi się w zależności od położenia mierzonego punktu. Z tego powodu rozmiar oraz ułożenie elipsy błędu są zmienne.

1.3. Błędy wynikające z przyjętej metody wykonywania pomiarów

Metoda pomiaru polegająca na ciągłym śledzeniu jednostki (*tracking*) powoduje występowanie dodatkowych błędów, nie spotykanych w trakcie wykonywania pomiarów statycznych. Błędy te spowodowane są głównie:

- niedokładnością wycelowania i nieutrzymaniem wiązki świetlnej dalmierza w mierzonym punkcie, który przez cały okres obserwacji pozostaje w ruchu;
- bezwładnością zastosowanego kompasu elektronicznego.

Niepewność pomiaru dynamicznego spowodowana błędami w przedstawionej postaci, nie jest możliwa do wyznaczenia podczas trwania eksperymentu właściwego. W tym celu przeprowadzono eksperyment terenowy, polegający na wykonaniu serii pomiarów, najpierw statycznych, a następnie dynamicznych do trzech kolejnych obiektów stałych (3 tarcze ustawione w linii).

Pomiar ten miał być imitacją pomiaru do obiektu w ruchu. Po przeprowadzeniu analizy statystycznej uzyskanych wyników zaobserwowano następujące prawidłowości:

- pomiar dynamiczny wykazuje większy rozrzut wyników niż pomiar statyczny,
- wartości średnie wyników pomiarów dynamicznych zbliżone są do średnich wartości odpowiadających pomiarowi statycznemu,
- rozrzut maleje wraz z oddalaniem linii pomiarowej od stanowiska pomiarowego.

Na podstawie otrzymanych danych, w wyniku dokonanej analizy statystycznej oraz logicznej stwierdzono, iż wielkość błędu spowodowanego zastosowaną metodą wykonywania pomiarów można przedstawić w formie błędów instrumentalnych, z zaznaczeniem iż odnoszą się do pomiaru wykonywanego w trybie dynamicznym.

Błędy instrumentalne przyrządów pracujących w trybie dynamicznym wynoszą odpowiednio:

- $\delta_d = 0,058\text{m}$ – dla pomiaru odległości (dalmierz),
- $\delta_\alpha = 0,41^\circ$ – dla pomiaru kąta (kompas).

2. Analiza błędów składowych

Przy analizie poszczególnych błędów składowych oraz czynników wpływających na ich wielkość nasuwają się następujące spostrzeżenia:

- największy wpływ na wielkość elipsy błędu ma dokładność charakteryzująca urządzenie w trybie pomiaru kąta,
- przyjmując jako błąd pomiaru kąta pewną stałą wartość wyrażaną w mierze kątowej, decydujący wpływ na wielkość elipsy błędu (półoś większą) ma odległość (d) mierzonego punktu od stanowiska pomiarowego,
- na ułożenie elipsy błędu wpływa kąt widzenia obserwowanego punktu (α).

Błąd wyznaczenia szerokości pasa ruchu statku (X) jest zatem funkcją odległości (d) oraz kąta widzenia (α) statku w stosunku do stanowiska pomiarowego:

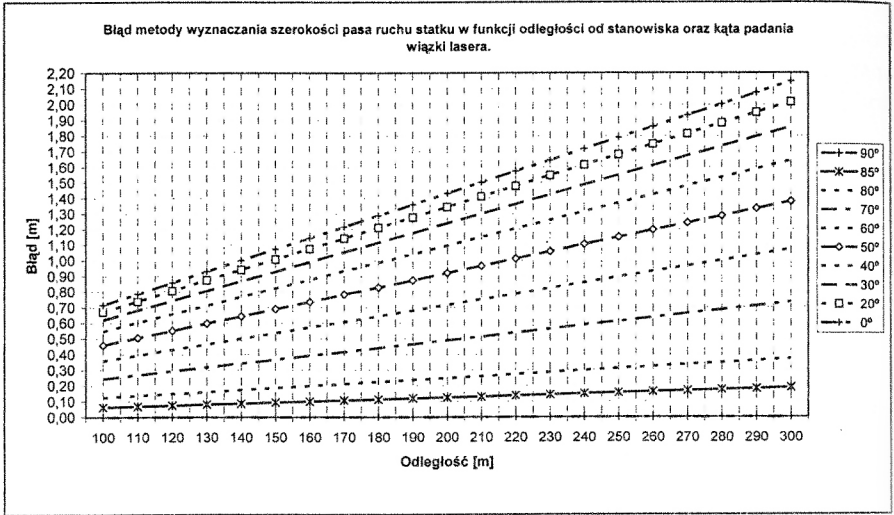
$$X = f(d, \alpha) \quad (6)$$

Na rysunku 3 zamieszczono diagram, przedstawiający wpływ odległości obserwowanego punktu od stanowiska (d) oraz kąta widzenia (α) na wielkość błędu wyznaczenia szerokości pasa ruchu jednostki w pojedynczym przejeździe (X).

Poszczególne proste reprezentują wartości kąta widzenia mierzonego punktu. Na osi odciętych umieszczono w porządku rosnącym odległości obserwowane

nego punktu od stanowiska pomiarowego, natomiast oś rzędnych reprezentuje wartość błędu (X).

Jest to diagram ogólny, odnoszący się do błędu powstającego na etapie pomiaru bezpośredniego, dotyczący burty bliższej dalmierzowi. Dokładność wyznaczenia położenia punktu na burcie przeciwnej obarczona jest dodatkowym błędem związanym z propagacją błędów składowych, dokładne wartości błędów przedstawiono na kolejnych diagramach na rysunkach 4 i 5.

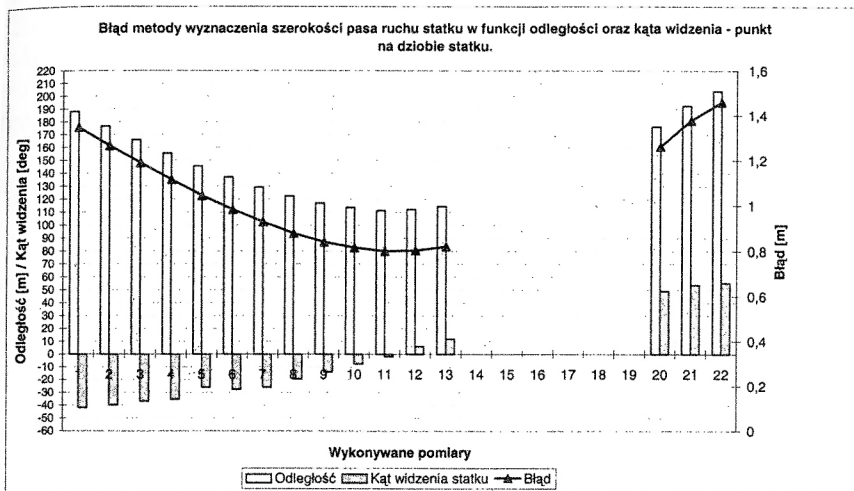


Rys.3 Diagram przedstawiający wielkość błędu metody wyznaczania szerokości pasa ruchu statku (X) w funkcji odległości od stanowiska pomiarowego (d) oraz kąta widzenia (α)
 Fig.3 Graph showing the error (X) of the ship's width path determination method, as a function of an object's distance (d) and angle of sight (α)

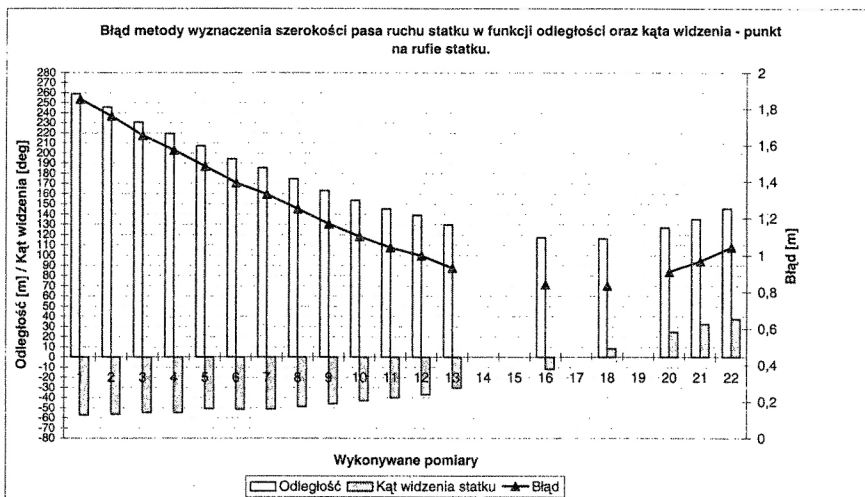
Diagramy na rysunkach 4 i 5 przedstawiają wpływ odległości oraz kąta widzenia obserwowanych punktów względem stanowiska pomiarowego, na dziobie i rufie statku, na wielkość błędu całkowitego metody dla kolejnych położen obserwowanych punktów. Wielkość błędu waha się od 0,8m dla odległości 120m do 1,9 m na odległości 270 m. Na rysunku 4 wielkości błędu odnoszą się do burty bliższej dalmierzowi. Wartości przedstawione na rysunku 5 charakteryzują błąd po stronie burty przeciwnej.

Różnice w wartościach błędu dla burty bliższej oraz przeciwnej wynikają z zastosowanej metody przenoszenia błędów w celu wyliczenia współrzędnych dla kolejnych położen charakterystycznego punktu po burcie przeciwnej stanowisku.

Punkt charakterystyczny w części dziobowej statku



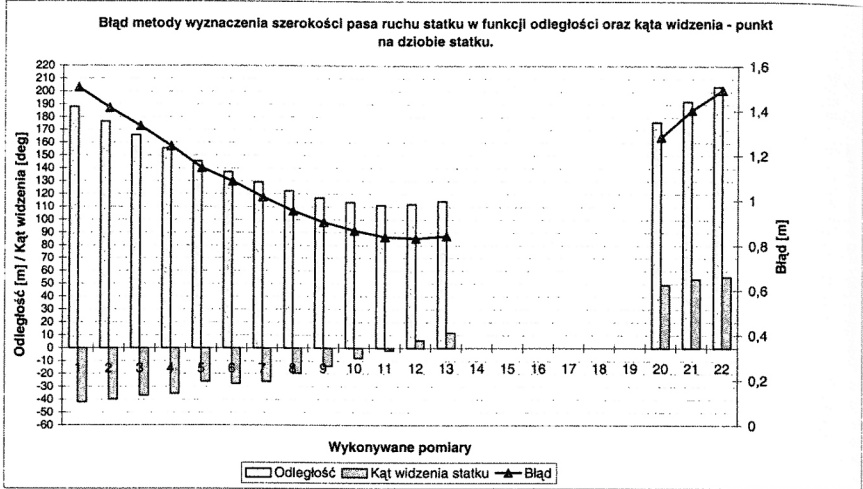
Punkt charakterystyczny w części rufowej statku



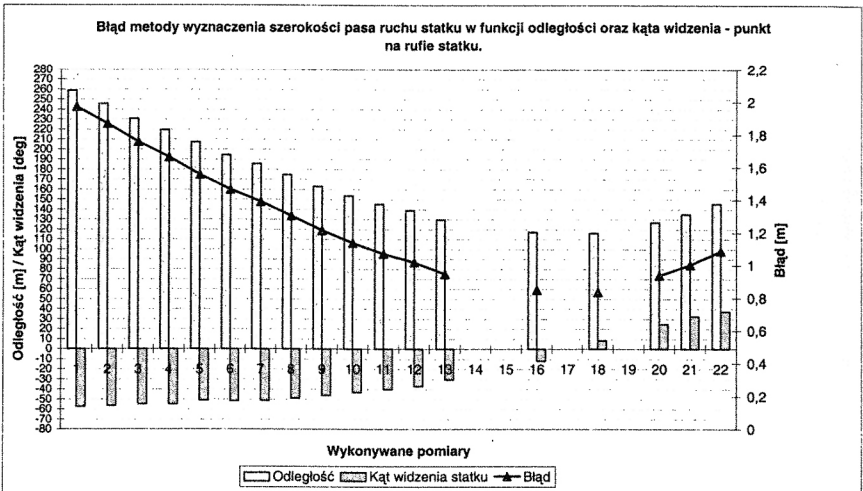
Rys. 4. Wpływ odległości jednostki od stanowiska pomiarowego (d) oraz kąta widzenia jednostki (α) na błąd całkowity metody (X) wyznaczania szerokości pasa ruchu, na przykładzie m/f „Pomerania” podczas wyjścia z portu w Świnoujściu dnia 27.07.2003 (burta bliższa dalmierzowi)

Fig.4. The influence of an object's distance (d) and angle of sight (α) on the total error of the method (X), based on example of m/f "Pomerania" port departure on 27.07.2003 (the side close to the measurement station)

Punkt charakterystyczny w części dziobowej statku



Punkt charakterystyczny w części rufowej statku



Burta przeciwna

Rys. 5. Wpływ odległości jednostki od stanowiska pomiarowego (d) oraz kąta widzenia jednostki (α) na błąd całkowity metody (X) wyznaczania szerokości pasa ruchu, na przykładzie m/f „Pomerania” podczas wyjścia z portu w Świnoujściu dnia 27.07.2003 (burta przeciwna)

Fig. 5. The influence of an object's distance (d) and angle of sight (α) on the total error of the method (X), based on example of m/f "Pomerania" port departure (the opposite side)

Dane odnoszą się do manewru wyjścia promu m/f „Pomerania” z portu w Świnoujściu. Przedstawione wyniki są rezultatem sesji pomiarowej przeprowadzonej w dniu 27.07.2003r oraz późniejszych badań terenowych mających na celu ustalenie faktycznej dokładności przyrządów pomiarowych oraz wielkości błędu całkowitego metody.

Wnioski

Przedstawiona analiza dokładności przyrządów oraz techniki pomiarowej wykorzystanej w metodzie rzeczywistej wyznaczania bezpiecznego obszaru manewrowego statku pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- dokładność określenia położenia punktu charakterystycznego statku może być opisana przez elipsę błędów,
- wpływ błędu pomiaru odległości na błąd całkowity metody jest niewielki,
- przeważający wpływ na wielkość elipsy błędu ma składowa związana z dokładnością pomiaru kąta,
- dokładność pomiaru kąta w trybie statycznym jest ponad dwukrotnie lepsza niż w trybie dynamicznym,
- błąd całkowity metody waha się w granicach 1,8 – 4m w zależności od położenia jednostki w stosunku do punktu pomiarowego,
- aby zmniejszyć błąd całkowity metody należy poprawić dokładność pomiaru kąta, stosując enkoder zamiast kompasu elektronicznego.

Literatura

1. Gucma S., *Inżynieria Ruchu Morskiego*, Okrętownictwo i żegluga. Gdańsk 2001.
2. Holeyko K., *Precyzyjne elektroniczne pomiary odległości i kątów*, Wydawnictwa Naukowe i Techniczne. Warszawa 1981.
3. Ojeda L., Borenstein J., *Experimental Results with the KVH C-100 Fluxgate Compass in Mobile Robots*, Proceedings of the IASTED International Conference Robotic and Application 2000; Honolulu, Hawaje, USA. 14-16 sierpień 2000.
4. Osada E., *Geodezja*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej; Wrocław; 2002.
5. Taylor J.R., *Wstęp do analizy błędu pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN S.A. Warszawa 1999.

Recenzent

prof. dr inż. kpt. ż.w. Mirosław Jurdziński

Adres Autora

mgr inż. Jakub Montewka

Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Inżynierii Ruchu Morskiego
ul. Wały Chrobrego 1/2
70-500 Szczecin
e-mail: kumo@wp.pl